

SPE Distinguished Lecturer Program

Программа выдающиеся лекторы SPE



The SPE Distinguished Lecturer Program is funded principally through a grant from the **SPE Foundation**.

The society gratefully acknowledges the companies that support this program by allowing their professionals to participate as lecturers.

Special thanks to the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers (AIME) for its contribution to the program.

Программа выдающиеся лекторы SPE спонсируется главным образом через грант **Фонда SPE**.

Общество выражает благодарность компаниям, поддерживающим программу, направляющие своих сотрудников для участия в ней в качестве лекторов.

Отдельная благодарность Американскому институту горной, металлургической и нефтяной промышленности (AIME) за его вклад в программу.



Cement and Cementing: An Old Technique With a Future?

Цементный раствор и Цементирование: Устаревший метод в будущем?

Bernard Piot

Schlumberger

Society of Petroleum Engineers
Distinguished Lecturer Program
www.spe.org/dl

Бернар Пийо

Компания Шлюмберже

Общество инженеров-нефтяников
Программа выдающиеся лекторы
www.spe.org/dl

Outline / Содержание

- Cement
- Cementing: a necessary evil?
- Alternative isolation techniques
- Today's well challenges
 - Cement versatility
- Well architecture tool for the future
- Цементный раствор
- Цементирование: необходимое зло?
- Альтернативные методы изоляции
- Проблемы современной скважины
 - Многостороннее использование цемента
- Инструмент построения скважины будущего

Cement/ Цементный раствор

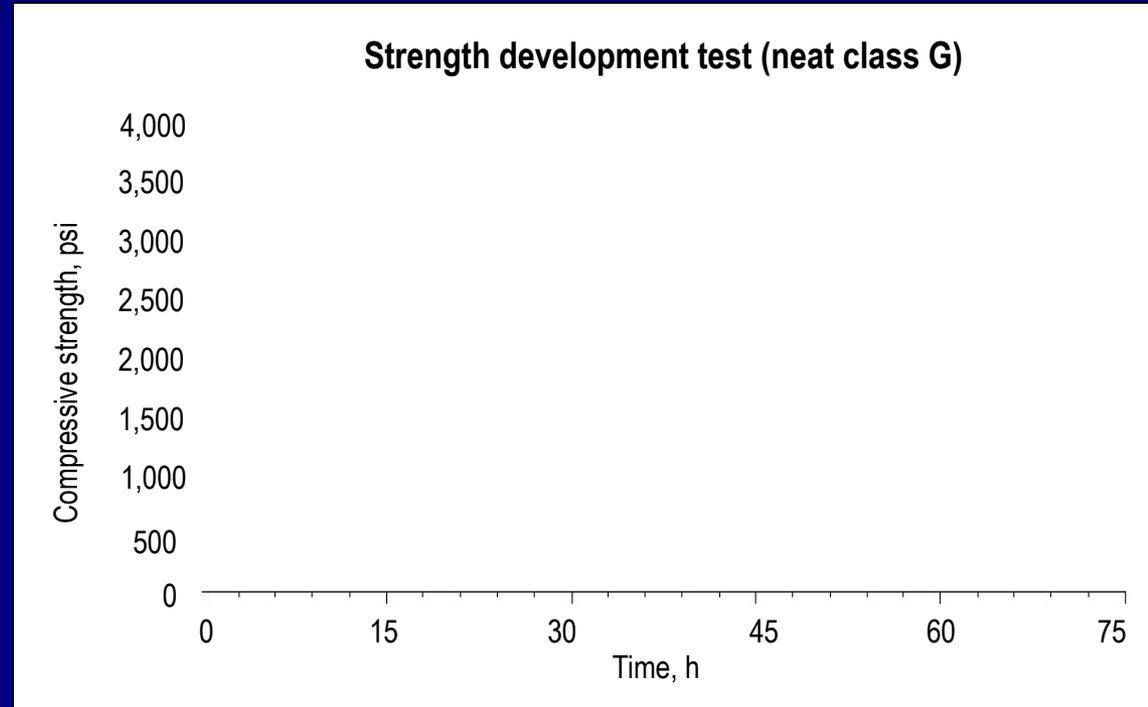
Material and Regulations

Материал и нормативы

Portland Cement

Портландцемент

- Hydraulic binder Гидравлическое вяжущее вещество
- Suspension (paste or slurry) for placement Суспензия (пастообразная масса или жидкий цементный раствор) для размещения
- Controllable setting Контролируемое схватывание
- Solid / Твердое вещество
 - Strong / Густое
 - Impermeable / Непроницаемое
- Inexpensive / Недорогое
- Available everywhere Имеется повсюду



History of Oilfield Cement

История развития промышленного цемента

- Before our era
 - Clay, lime
 $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$
 - Roman times
 - Pozzolanic cements
 - 1824: Portland cement
 - Selected raw materials
 - 1903: Portland cement in oil wells
 - 1917: “Oilfield” cements
- До нашей эры
 - Глина, известь
 $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$
 - Эпоха римской империи
 - Пуццолановый цемент
 - 1824 г.: Портландцемент
 - Отобранные сырьевые материалы
 - 1903 г.: Использование портландцемента в нефтяных скважинах
 - 1917 г.: “Промысловые” цементные растворы

History of Oilfield Cement

История развития промышленного цемента

- API created 20 Mar 1919
 - 1940: ASTM Types 1 to 5
 - 1948: API Code 32 released
 - Became API RP10B in 52
 - 1952: 6 classes of cement
 - 1953: API Std 10A
 - API Spec 10A in 72
 - ISO 10426 since 2000
- Создание API 20 марта 1919 г.
 - 1940 г.: Типы ASTM от 1 до 5
 - 1948 г.: выпущен API Код 32
 - Стал API RP10B в 52
 - 1952 г.: 6 классов цемента
 - 1953 г.: API Std 10A
 - API Spec 10A в 72
 - ISO 10426 с 2000 г.

Cement Types

Типы цементных растворов

- Construction cements
 - Common cement
 - API classes A, B, C
- Retarded cements
 - Deeper wells
 - Classes D, E, F
 - Pressurized consistometer
 - Cementing companies
 - Abandoned early 80s
- Строительный цемент
 - Обычный цемент
 - API классы A, B, C
- Цемент с замедленным сроком схватывания
 - Более глубокие скважины
 - Классы D, E, F
 - Консистомер для замеров под давлением
 - Компании, занимающиеся цементированием
 - Ликвидирован в начале 80-х

Типы цементных растворов

- **Plain Portland cement**
 - Classes G, H
 - Quality control, reproducibility
 - More universal
- **Class J cement**
 - Replaced by G/H + Silica
- **Slag cement**
 - ~80s Brine resistance
 - ~90s Mud compatibility
- **Others**
- **Простой портландцемент**
 - Классы G, H
 - Контроль качества, воспроизводимость
 - Более универсальный
- **Цемент класса J**
 - Замещается G/H + кремний
- **Шлаковый цемент**
 - ~80-е сопротивление соляному раствору
 - ~90-е совместимость с буровым раствором
- **Прочие**

Use of Cement

Использование цемента

- USA
 - ~ 80% class H and G
 - ~ 10% class A, ~ 10% Class C
- Rest of the world (international service companies)
 - >95% class G (often imported)
 - Class A or C; or local common cement: preferentially Type V (ASTM), or CEM-I 42.5 or 52.5 (EN 197-1)
 - Logistics allowing
 - If good and even quality
 - If adequate quality control
- США
 - ~ 80% классы H и G
 - ~ 10% класс A, ~ 10% Класс C
- В других странах (международные сервисные компании)
 - >95% класс G (часто импортируется)
 - Класс A или C; или местный обычный цемент : предпочтительно типа V (ASTM), или CEM-I 42.5 или 52.5 (EN 197-1)
 - Учет логистики
 - При хорошем или умеренном качестве
 - При соответствующем контроле качества

From API to ISO (since 1998)

от API до ISO (с 1998 г.)

- API Committee 10
- ISO TC 67 /SC 3/WG 2
- ISO 10426 – well cements
 - ISO 10426-1 (ANSI/API 10A) - specification
 - ISO 10426-2 (ANSI/API RP 10B-2) - testing
 - ISO 10426-3 (ANSI/API RP 10B-3) – deepwater wells
 - ISO 10426-4 (ANSI/API RP 10B-4) - foam cement
 - ISO 10426-5 (ANSI/API RP 10B-5) – shrinkage/expansion
 - ISO 10426-6 (ANSI/API RP 10B-6) – static gel strength
- Other work groups:
 - Evaluation (logs), High Temperature, Deepwater...
- API Комитет 10
- ISO TC 67 /SC 3/WG 2
- ISO 10426 – тампонажные цементы
 - ISO 10426-1 (ANSI/API 10A) - спецификация
 - ISO 10426-2 (ANSI/API RP 10B-2) - тестирование
 - ISO 10426-3 (ANSI/API RP 10B-3) – глубоководные скважины
 - ISO 10426-4 (ANSI/API RP 10B-4) - пеноцемент
 - ISO 10426-5 (ANSI/API RP 10B-5) – усадка/расширение
 - ISO 10426-6 (ANSI/API RP 10B-6) – статическое напряжение сдвига
- Другие рабочие группы:
 - Оценка (каротаж), высокая температура, глубоководные...

Cementing: A Necessary Evil?

Цементирование: необходимое зло?

Evolution of Equipment and Technology,
and an Outline of Their Shortcomings

Эволюция оборудования и технологии,
и обзор недостатков

Technology Older Than a Century

Технология старше века

- First well cementing ~ 1903
 - Perkins Oil Well Cementing Co., Calif.
 - Shovel/cement mixer
- Первое цементирование скважины ~ 1903
 - Компания Perkins Oil Well Cementing Co., Калифорния.
 - Лопаточный/цементный миксер
- First use of an eductor
 - Jet mixer invented 1921
 - “High pressure” mixing
 - In use till the 1970s
 - Still used by some
 - Gravity cement feed
- Первое применение эдуктора
 - Изобретение гидросмесителя в 1921 г.
 - Смешение при “высоком давлении”
 - Использовался до 1970-х
 - Кто-то до сих пор его использует
 - Подача цемента самотеком



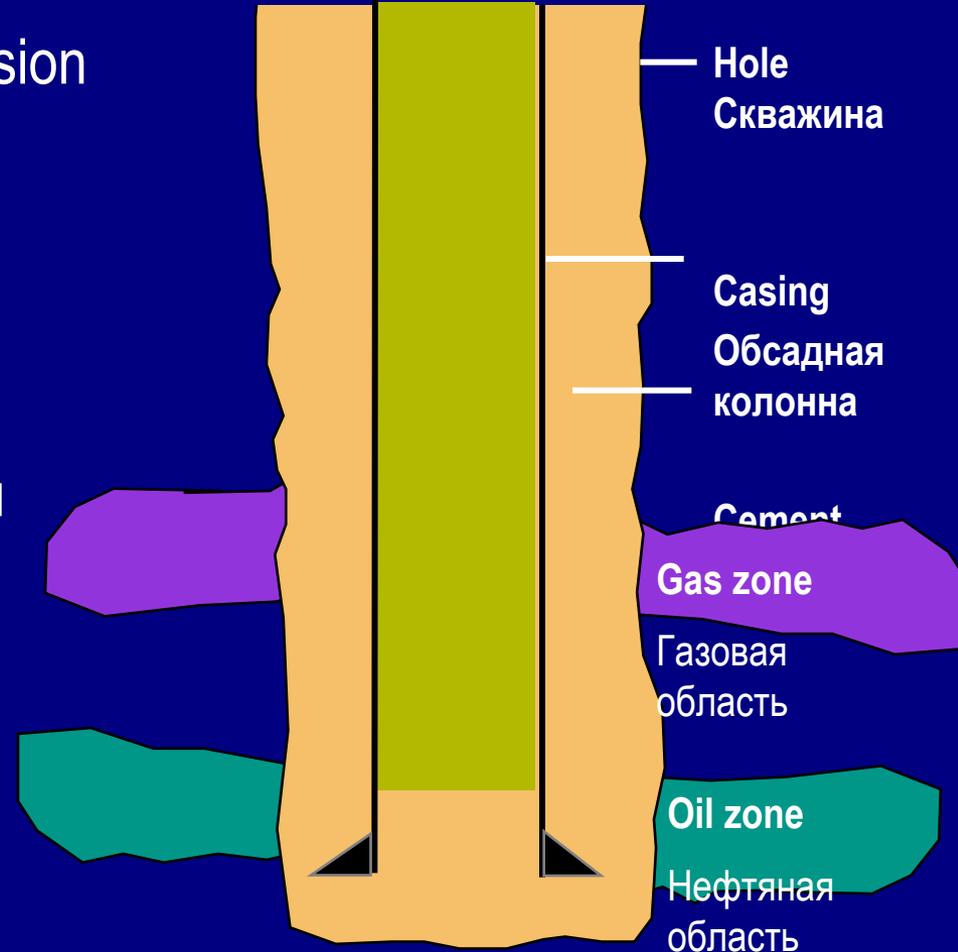
Primary Cementing Objectives

Главные задачи цементирования

- Casing anchor (axial support)
- Protection against corrosion and erosion
- Support of borehole walls

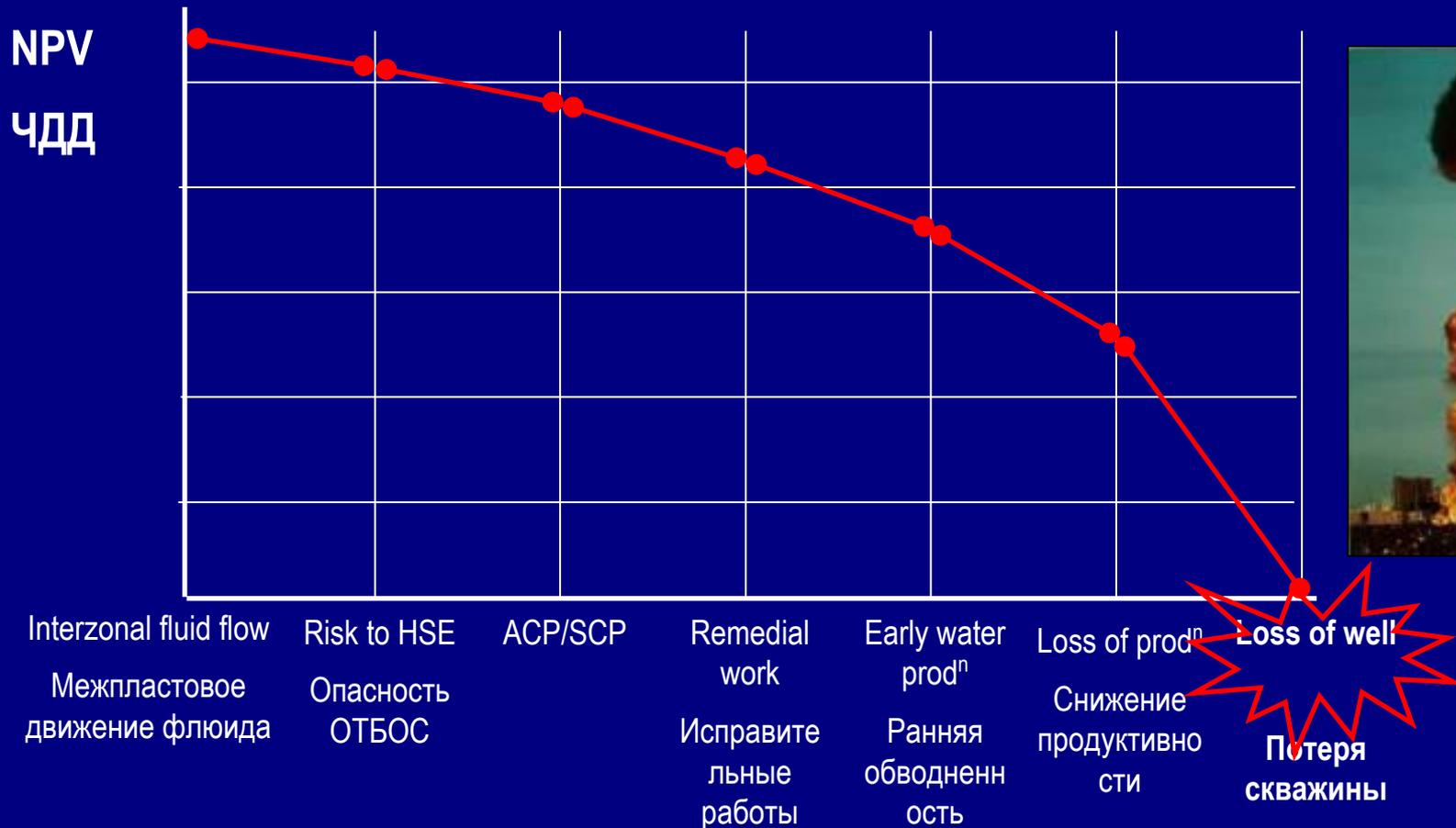
- **Zonal isolation**

- Якорь обсадной колонны (осевая опора)
- Защита от коррозии и эрозии
- Опора внутрискважинных стенок
- **Разобшение пластов**



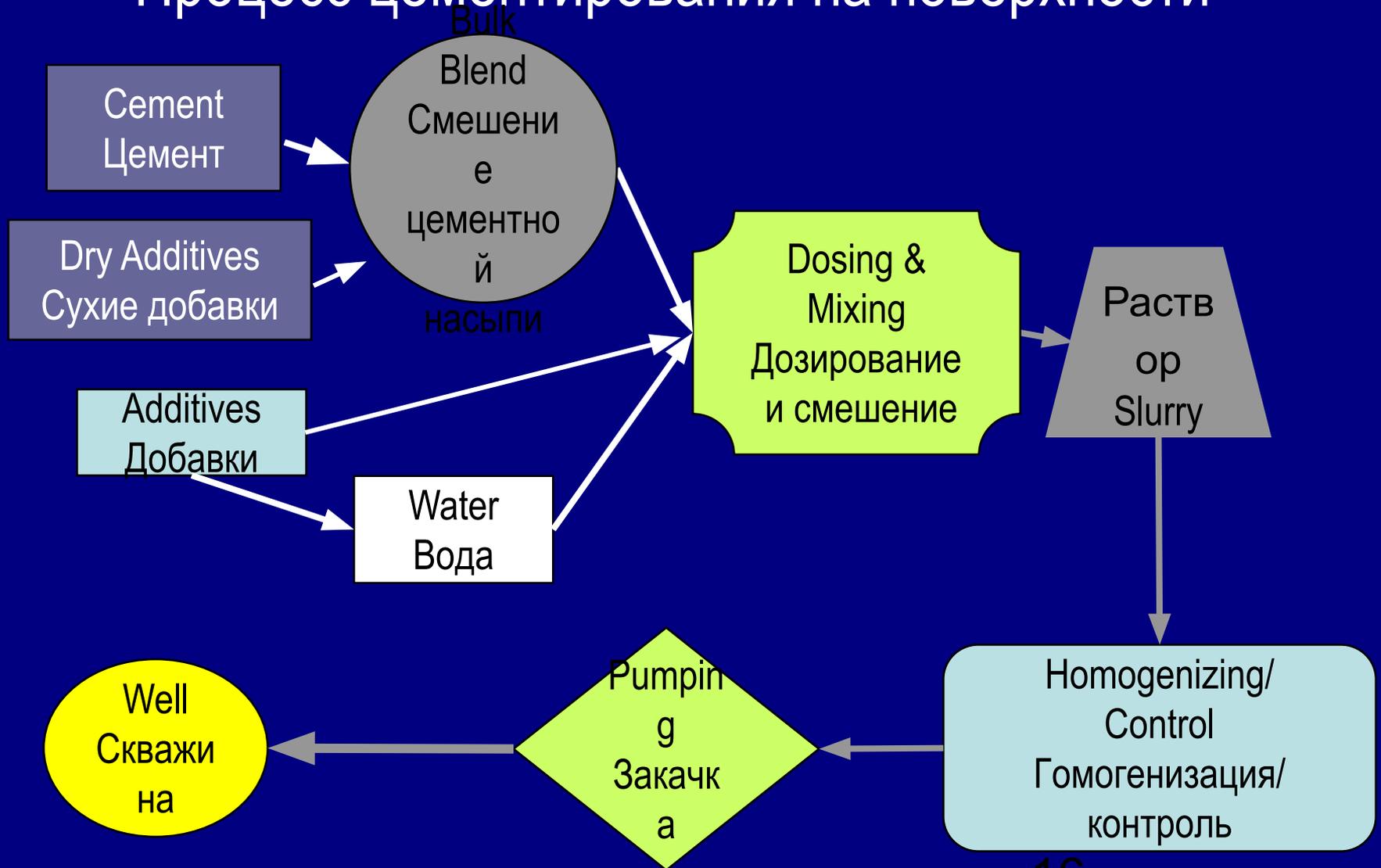
Unsuccessful Zonal Isolation

Неудачное разобщение пластов



Cementing Process at Surface

Процесс цементирования на поверхности



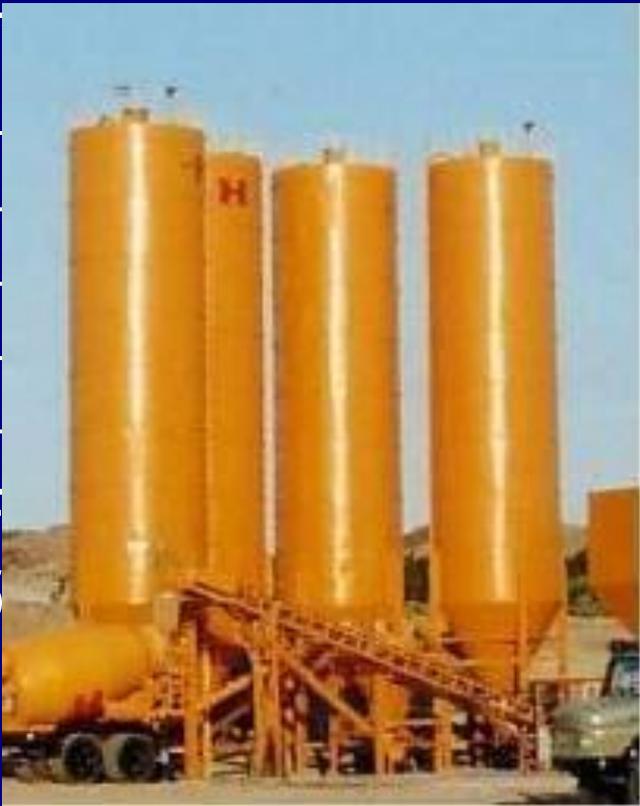
Handling Dry Cement / Работа с сухим цементом

- From cutting sacks to pneumatic handling
От упаковки в мешки до пневматической
- Storage / Хранение
- Transport / Транспортировка
- Blending/ Смешивание

- Transport (by air)



- Fully automated



Control of Mixing

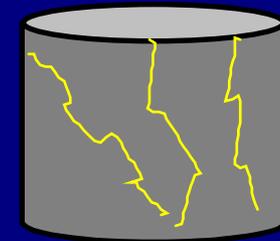
Контроль процесса приготовления цементной смеси



+



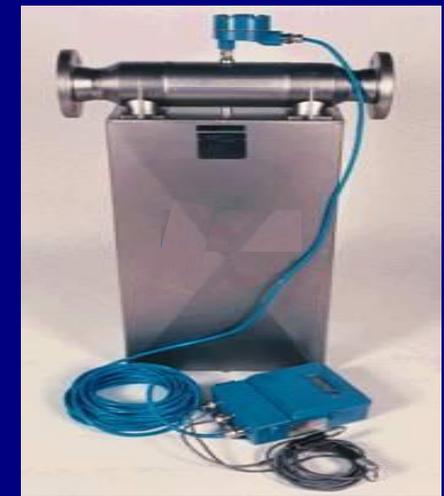
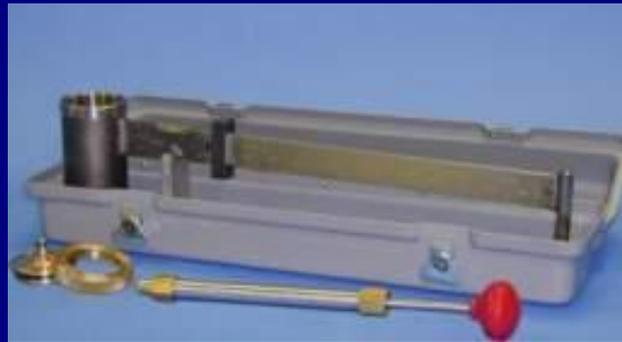
=



SLURRY SG ~ 1.9
РАСТВОР SG ~ 1.9

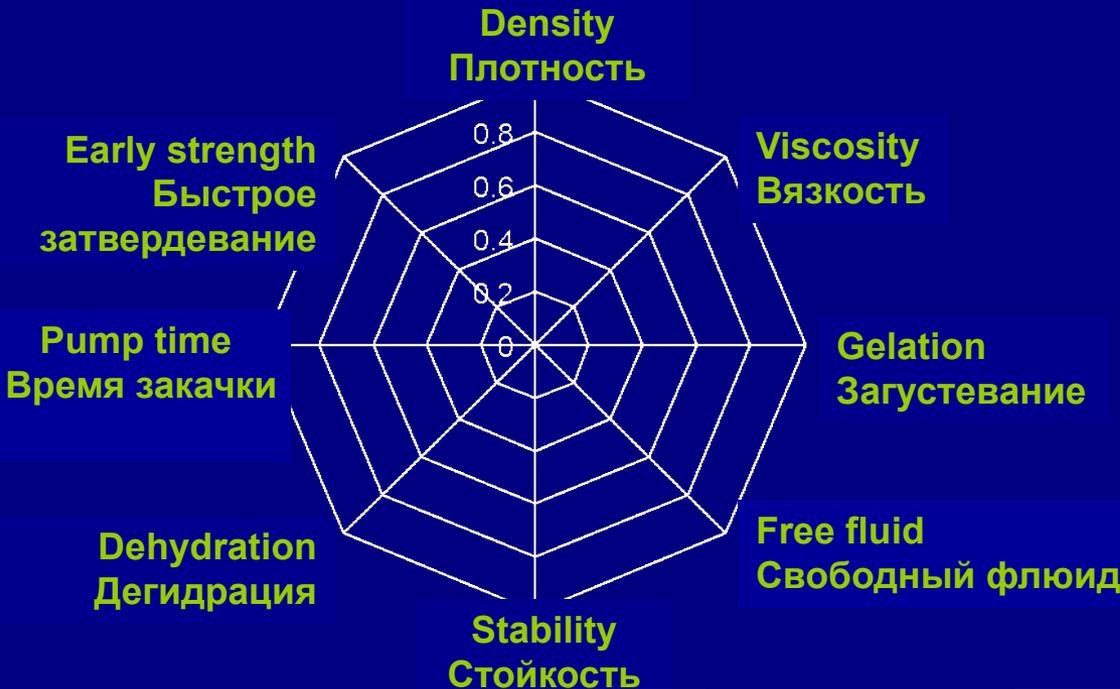
Density Control

Контроль плотности

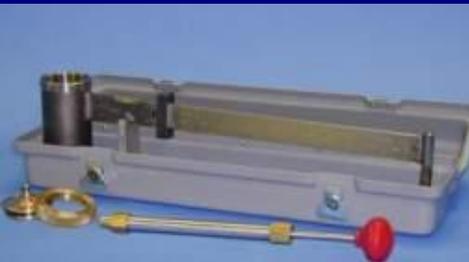


Cement Quality = Slurry Performance

Качество цемента = Характеристики цементного раствора



- **W/C ratio; extender; weighting agent** Отношение вода/цемент; наполнитель; утяжелитель
- **Dispersant / viscosifier**
Дисперсант/ загуститель
- **Anti-settling agent**
Противоосаждающее вещество
- **Fluid loss agent**
Понизитель фильтрации
- **Retarder/accelerator**
Замедлитель/ ускоритель



Cementing Additives Key Milestones

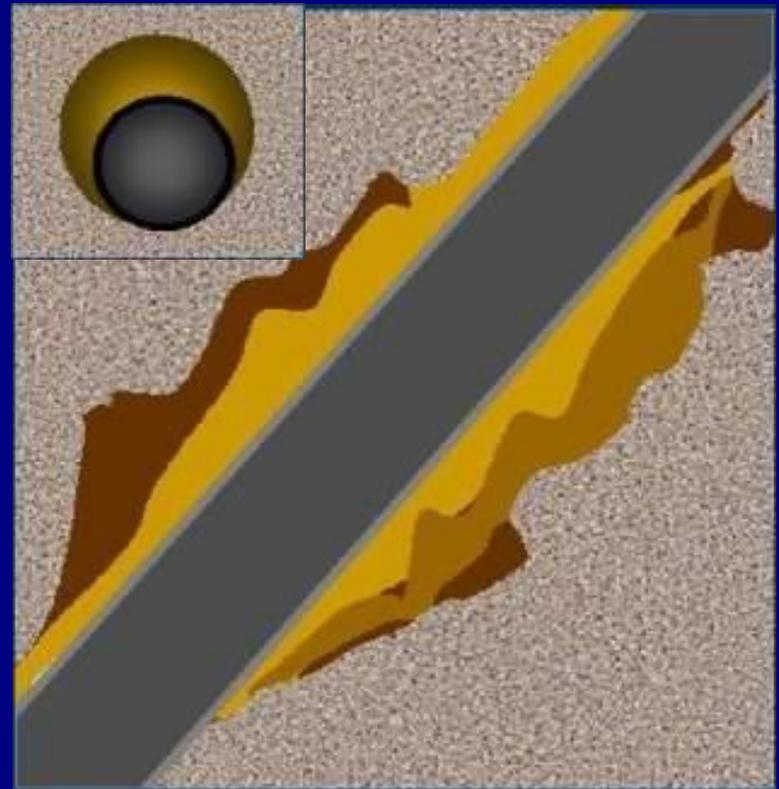
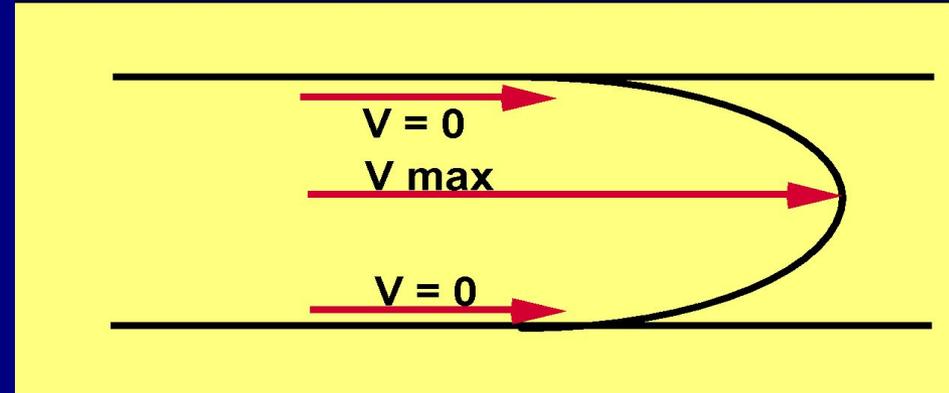
Ключевые моменты в истории разработки цементных добавок

- Lignosulphonates and cellulosics
- Sugars and superplasticizing agents (~ 1960s)
- Polyamine/imine (~1970s)
- SB Latex (~ 1980s)
- Co/ter-polymers AMPS (~ 1980s)
 - Temperature stability
- Biopolymers (~ 1990s)
 - Not based on Xanthan gum
- Environmentally friendly additives (end 1990s)
 - OSPAR (OSlo-PARis) convention 1998
- Лигносульфонаты и целлюлозные полимеры
- Сахара и суперпластификаторы (~ 1960-е)
- Полиамины/имины (~1970-е)
- SB латекс (~ 1980-е)
- Со/три-полимеры AMPS (~ 1980-е)
 - Теплоустойчивость
- Биополимеры (~ 1990-е)
 - Не на основе ксантановой смолы
- Экологические чистые добавки (конец 1990-х)
 - Конвенция ОСПАР (ОСло-ПАРижс) 1998 г.

Cementing Process Downhole

Процесс цементирования внутри скважины

- Failures identified 30-40s
- Field practices
 - Turbulent displacement
 - High Reynolds $\sim 50s$
 - 10 min contact $\sim 60s$
 - SloFlo / Plug Flow $\sim 70s$
 - Fluid with yield stress
- Дефекты, выявленные в 30-40-е
- Промысловые технологии
 - Турбулентное замещение
 - Большое число Рейнольдса $\sim 50e$
 - 10-ти мин. контакт $\sim 60e$
 - SloFlo / Пробковый режим $\sim 70e$
 - Флюид с пределом текучести



Cementing Process Downhole

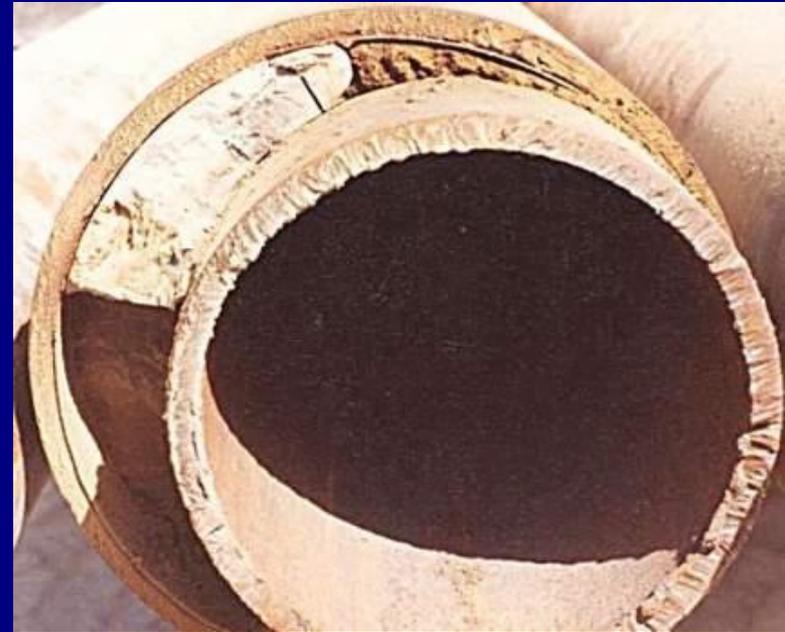
Процесс цементирования внутри скважины

- Displacement studies
 - Yield stress fluids ~end 60s
 - Mobility ratio/differential velocity ~70s
 - “Pump as fast as you can”
 - All semi-empirical
- Very mixed results
 - Even in vertical wells
- Исследования процесса вытеснения
 - Флюиды предела текучести ~конец 60-х
 - Коэффициент подвижности /разность скоростей~70-е
 - “Закачивайте как можно быстрее”
 - Все полуэмпирические
- Крайне противоречивые результаты
 - Даже по вертикальным скважинам

Mud Removal Modeling

Моделирование процесса вытеснения бурового раствора

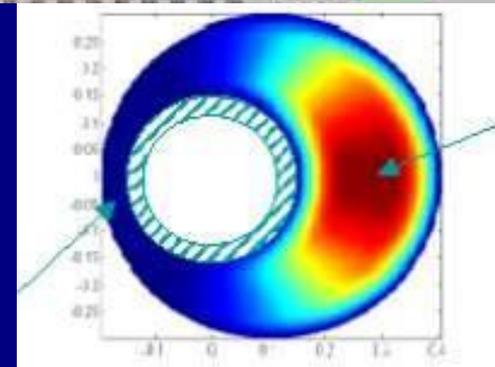
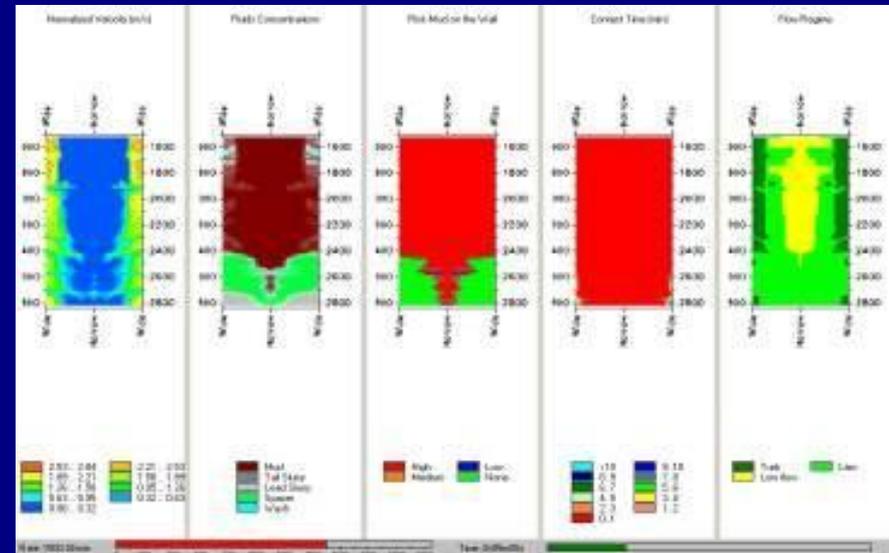
- More complex wells
 - Deviated, horizontal & extended reach
- **Более сложные скважины**
 - Наклонно-направленные, горизонтальные и с большим отходом от вертикали
- More critical wells
 - Deepwater, high-pressure high-temperature
- **Более критичные скважины**
 - Глубоководные, с высоким давлением, высокой температурой
- Importance for Zonal Isolation
 - Very difficult modeling
 - Computational Fluid Dynamics (CFD) tools not applicable
- Важность для разобщения пластов
 - Крайне сложное моделирование
 - Приборы для вычисления динамики флюида (CFD) не применимы



Mud Removal Modeling

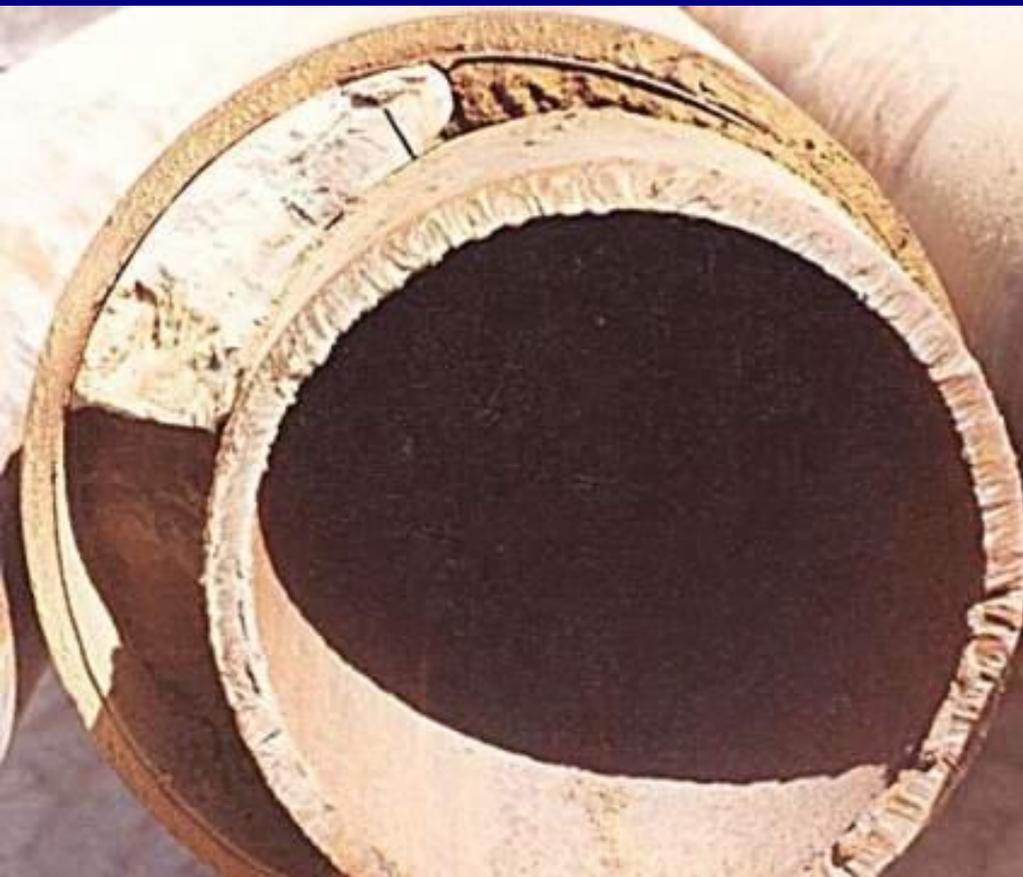
Моделирование процесса вытеснения бурового раствора

- Eccentricity effects
 - Modeling ~ end 80s
 - Turbulent/Effective Laminar Flow
 - Rheology/Density contrast
- Эффекты эксцентриситета
 - Моделирование ~ конец 80-х
 - Турбулентный/ эффективный ламинарный поток
 - Сопоставление реологии /плотности
- Erodability / PDGM concept
 - Polymer muds
- Концепция эродируемости / PDGM
 - Полимерные буровые растворы
- Numerical 2D Modeling (2002)
- Числовое 2D моделирование (2002 г.)
- Lubrication analytical model (2003)
- Расчетная модель смазки (2003 г.)



Mud Removal Modeling

Моделирование процесса вытеснения бурового раствора



Mud Displacement Simulation

Имитация процесса вытеснения бурового раствора

CFD fluid /fluid displacement in eccentered geometries

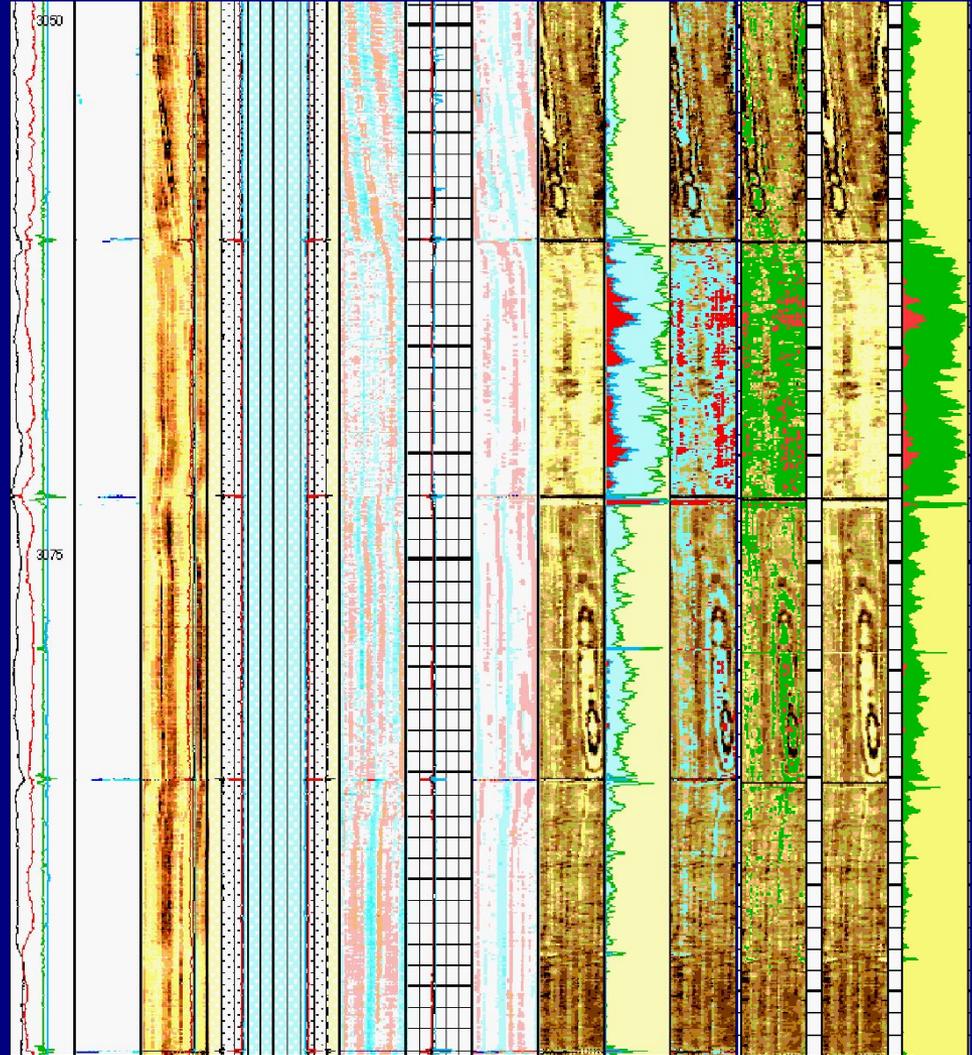
Вычислительная гидродинамика флюида /вытеснение флюида в эксцентрических сетках модели

| Geometry Геометрия | Rheology Реология | Fluid type Тип флюида | CPU time Счетное время |
|-----------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| 2D | Newtonian Ньютоновская | Same Такой же | 10 minutes/минут |
| 2D | Newtonian Ньютоновская | Different Другой | 2-4 hours/часов |
| 2D | Viscoplastic | Different Другой | 4-8 days /дней |
| 3D | Newtonian Ньютоновская | Different Другой | 15 hours /часов |
| 3D | Viscoplastic | Different Другой | 1 month? 1 месяц? |

Cement Evaluation Logs

Диаграммы качества цемента

- Limitation of cement logs
 - Strength or Impedance ~80s
 - Microannulus/Isolation???
 - Microdebonding ~mid-90 s
 - Casing interface exclusively
 - Ограничения диаграмм акустического цементомера
 - Прочность или сопротивляемость ~80-е
 - Микро зазоры между обсадной колонной и цементным камнем / Изоляция???
 - Микро нарушения сцепления ~середина 90-х
 - Поверхность обсадной колонны исключительно



Cement Evaluation Logs

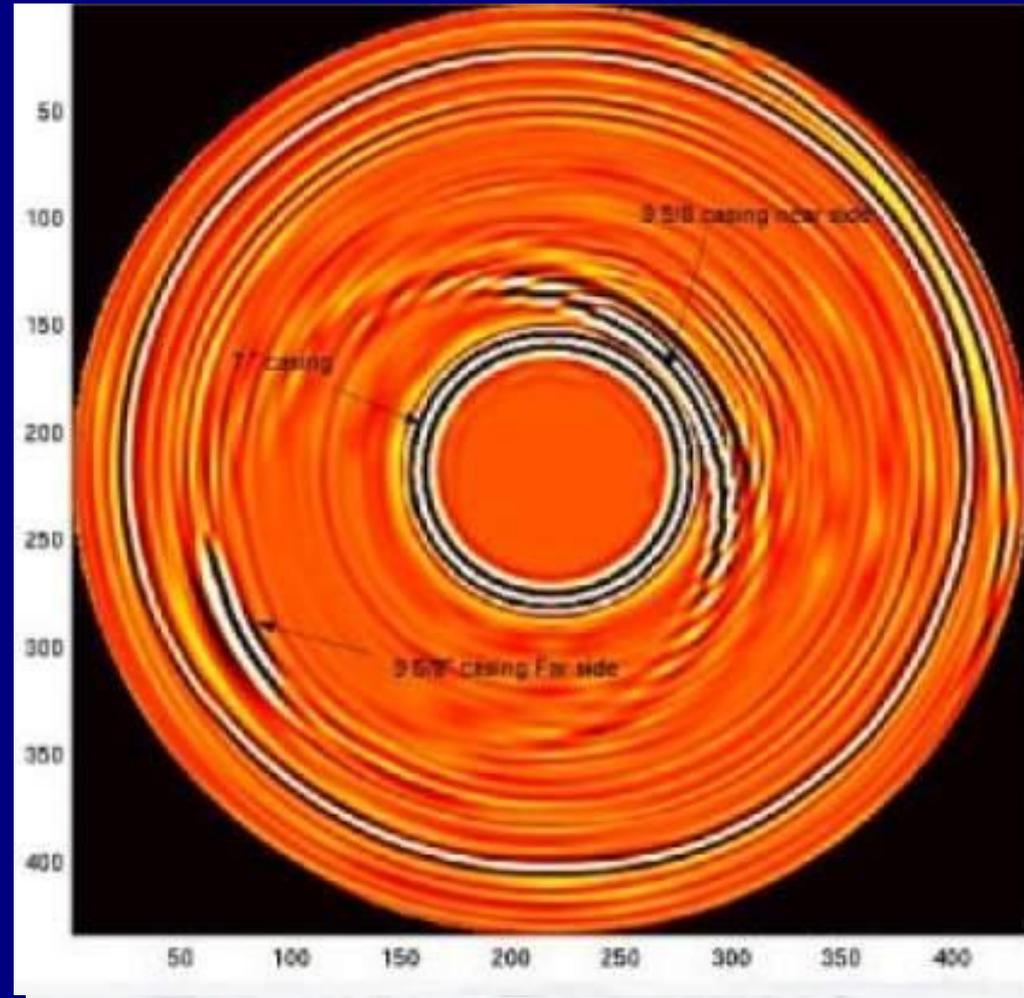
Диаграммы качества цемента

- Flexural Attenuation (2006)

- 1 + 3 sensors
- Full cemented annulus width
- 3rd interface
- Differentiate lightweight cements from liquids
- Confirm hydraulic isolation
- Visualize casing in borehole

- Флексурное затухание 2006

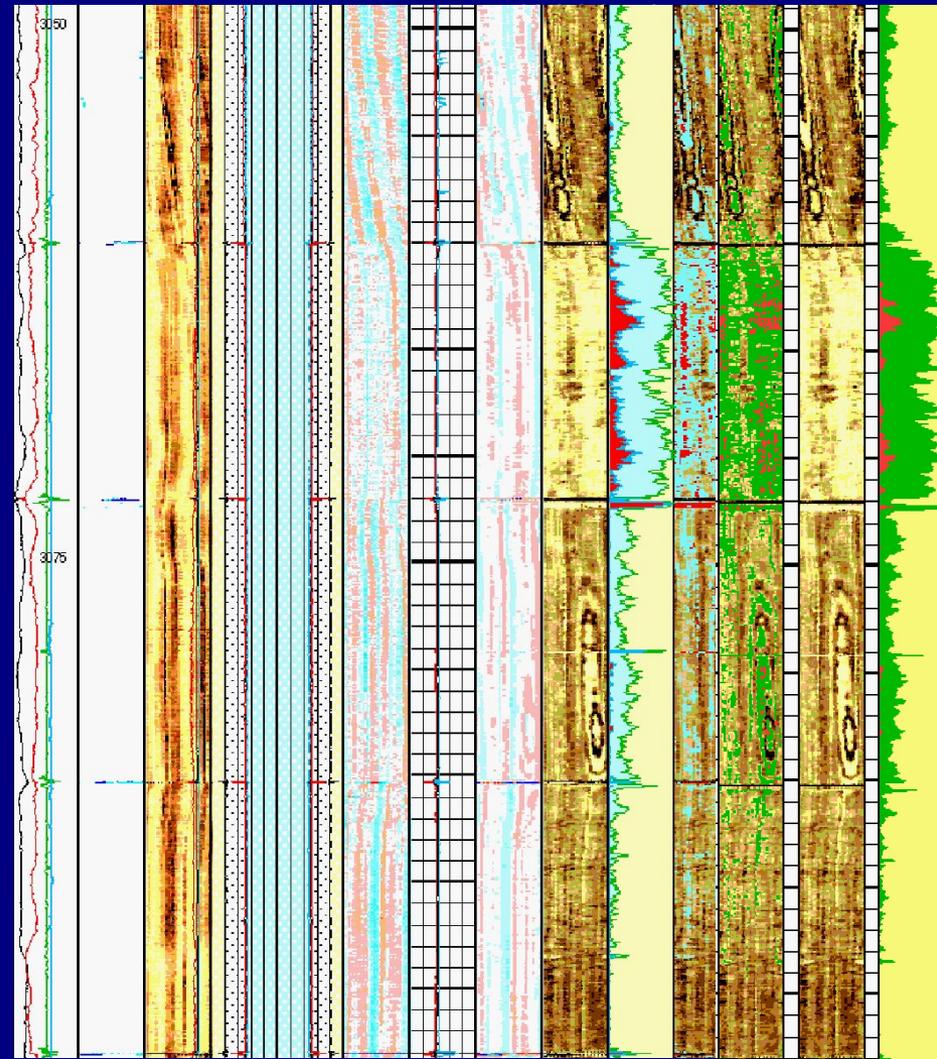
- 1 + 3 датчика
- Затрубное пространство, зацементированной по всей ширине
- 3-я поверхность
- Отличие облегченного цемента от жидкостей
- Подтверждение гидравлической изоляции hydraulic isolation
- Визуализация обсадной колонны внутри скважины



Cement Evaluation Logs

Диаграммы качества цемента

- Акустический каротаж
 - Акустический цементомер (CBL) ~60-е
 - Компенсированный акустический цементомер ~80-е
 - Сегментированный компенсированный
- Ультразвуковой каротаж
 - 8 датчиков ~80-е
 - 1 вращающийся датчик ~90-е
- Ограничения диаграмм акустического цементомера
 - Прочность или сопротивляемость ~80-е
 - Микро зазоры между обсадной колонной и цементным камнем / Изоляция???
 - Микро нарушения сцепления ~середина 90-х
 - Поверхность обсадной колонны исключительно



Alternative Isolation Techniques

Альтернативные методы ИЗОЛЯЦИИ

Other Fluids and Mechanical Means

Прочие флюиды и средства механизации

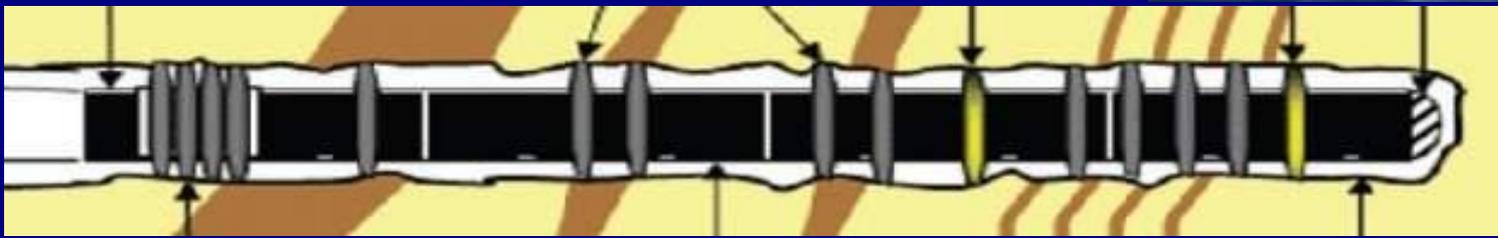
Organic Resins

Органические смолы

- Very limited applications
 - Cost
 - Shelf-life
 - Sensitivity
 - Health, safety, and environment
 - Compatibility (water, mud...)
 - Placement
 - ...
- Крайне ограниченное применение
 - Затраты
 - Срок годности
 - Чувствительность
 - Охрана труда, техника безопасности и охрана окружающей среды
 - Совместимость (с водой, буровым раствором...)
 - Размещение
 - ...

Mechanical Systems / Механические системы

- Complementary to cement
 - Casing drilling, expandable casing (EC)
 - Swellable elastomer layer
- Дополнительно к цементу
 - Бурение на обсадных трубах, расширяющаяся обсадная колонна (ЕС)
 - Слой набухающего эластомера
- Exclusive of cement
 - EC/ Casing with (oil or water) swellable packer
 - Another form of completion
 - May still require cement for most other casings
- Без цемента
 - EC/Обсадная колонна с (нефть или вода) разбухающим пакером
 - Другая форма заканчивания
 - Цемент может потребоваться для большинства других обсадных колонн



**Today's Well Challenges and
Versatility of Cement**

**Современные проблемы скважин
и эксплуатационная гибкость
цемента**

New Reservoir Isolation Challenges

Новые проблемы изоляции пластов

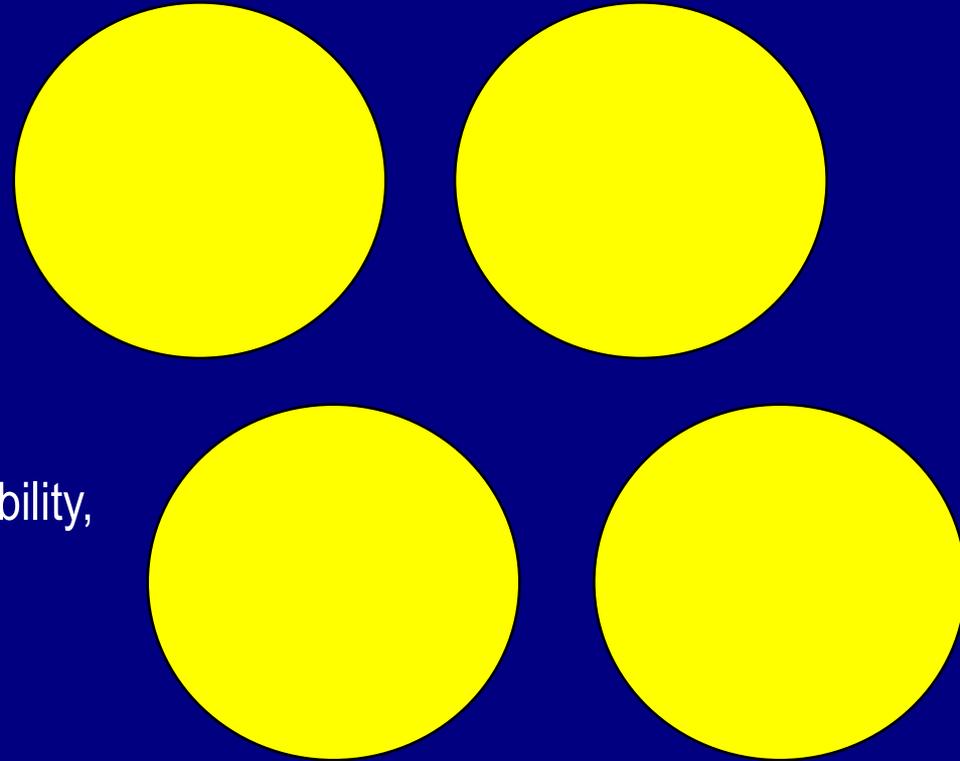
- Aging and depleting fields
 - Completions at lower pressures
 - Steam injection, stimulation
 - Workovers and repairs
 - Plugging and abandonment
- Exploration and new developments
 - Isolation under higher pressure and temperature
 - Very narrow pore/frac pressures margin
 - In deeper water and at colder temperatures
- Старые и истощающиеся месторождения
 - Заканчиваяния при более низких давлениях
 - Закачка пара, интенсификация притока
 - Капитальный ремонт и текущие ремонтные работы
 - Закрытие и ликвидация
- Разведка и новые разработки
 - Изоляция при более высоком давлении и температуре
 - Малая разность между поровым давлением и давлением гидроразрыва
 - В глубоких водах и при более низких температурах



Need for Ultra-Low Density

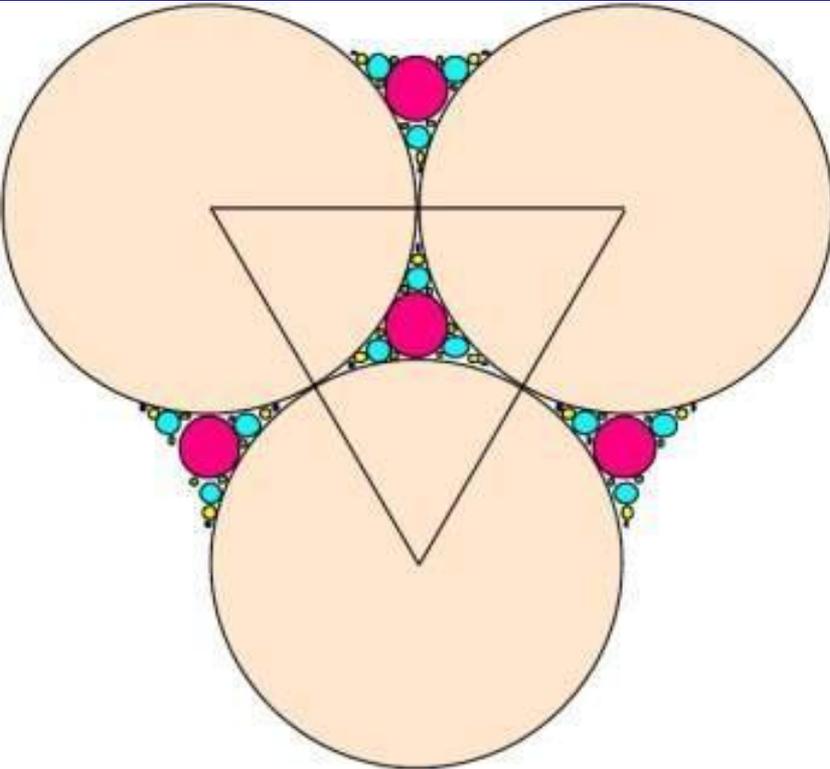
Необходимость сверхнизкой плотности

- Conventional Cement Slurries
 - Directly linked to W/C ratio
 - Slurry
 - Very low rheology
 - Stability
 - Set cement
 - Very low strength, high permeability, very long setting times
- Обычные цементные растворы
 - Напрямую связан с водоцементом
 - Раствор
 - Крайне низкая реология
 - Устойчивость
 - Затвердевший цемент
 - Крайне низкая прочность, высокая проницаемость, продолжительное время схватывания



Need for Ultra-Low Density

Необходимость сверхнизкой плотности



- High performance /high solid cements
 - Adapted from concrete industry
 - Same water/solid ratio at all densities
 - From 900 to 2800 kg/m³
 - Similar rheology
 - High strength, low permeability
- Высококачественный/крайне твердый цемент
 - Заимствован из цементной промышленности
 - Одинаковое значение водотвердого отношения при любой плотности
 - От 900 до 2800 кг/м³
 - Сходная реология
 - Высокая прочность, низкая проницаемость

Slurry Quality Control?

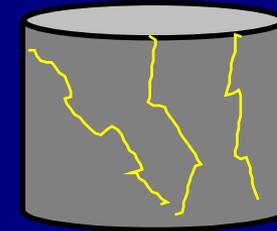
Контроль качества цемента



+



=



Slurry Density - 1.0 ??
Плотность раствора - 1.0??

What if density 1.0?
Что, если плотность 1.0?

Solid Fraction Monitoring

Мониторинг твердой фракции



Well Architecture and Logistics

Построение скважины и логистика

- Lighter isolation-quality cements

Цементы, обладающие качеством более легкой изоляции

- Depleted reservoirs

Истощенные коллекторы

- Single-stage cementing

Одноступенчатое цементирование

- Production liner instead of casing

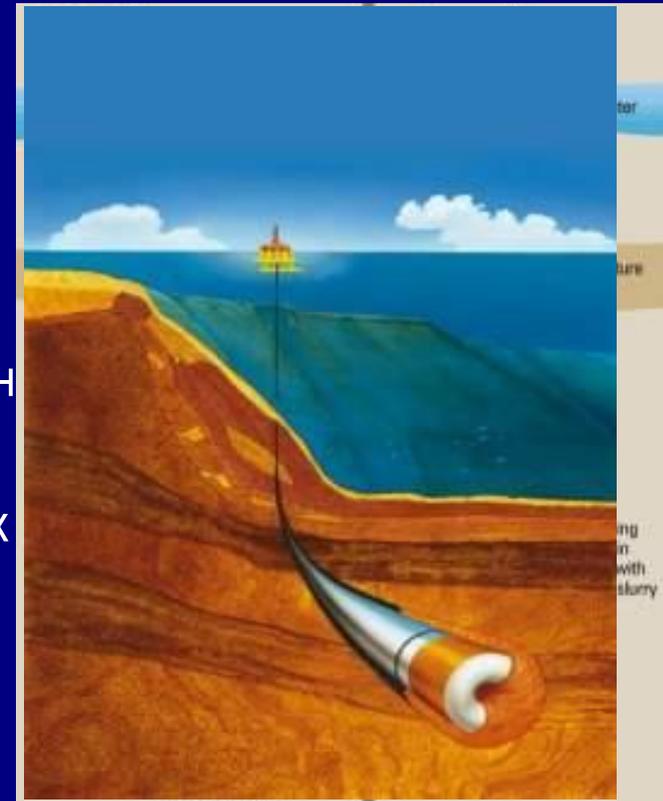
Эксплуатационный хвостовик вместо обсадной колонны

- Light cements that set faster at low temperatures

Облегченные цементы, быстро схватываются при низких температурах

- Deepwater conductors, surface casings...

Глубоководные направляющие колонны, кондукторные колонны...



Is Isolation Durable?

Является ли изоляция устойчивой?

Cement is strong, but fragile
Цемент твердый, но хрупкий

- Understanding failures

Понимание дефектов

- P or T increases

Р или Т увеличиваются

- Drilling, milling, repairs

Бурение, измельчение, ремонт

- P or T decreases

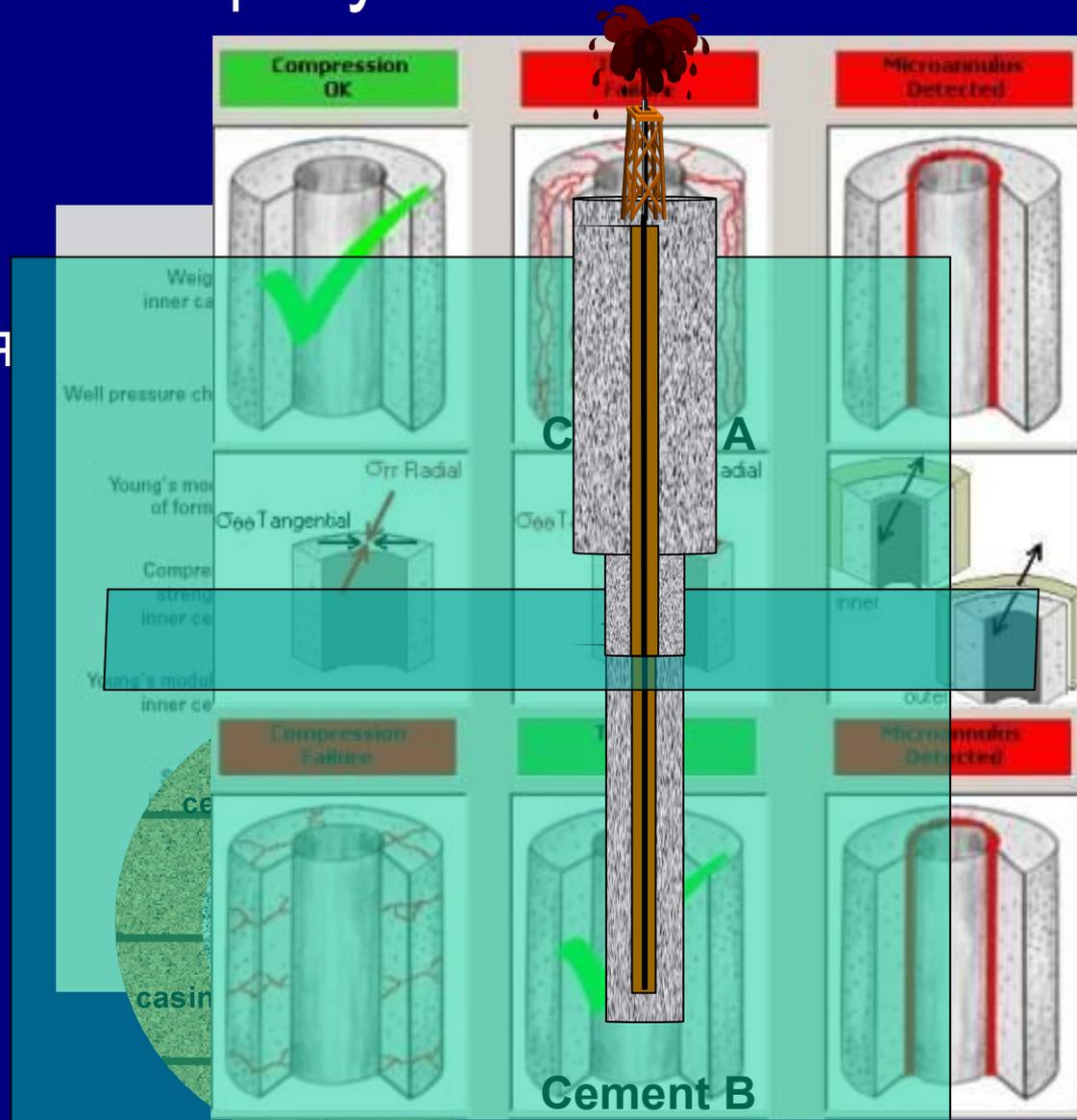
Р или Т снижаются

- Modeling capability

Моделирующая способность

- Parameter sensitivity

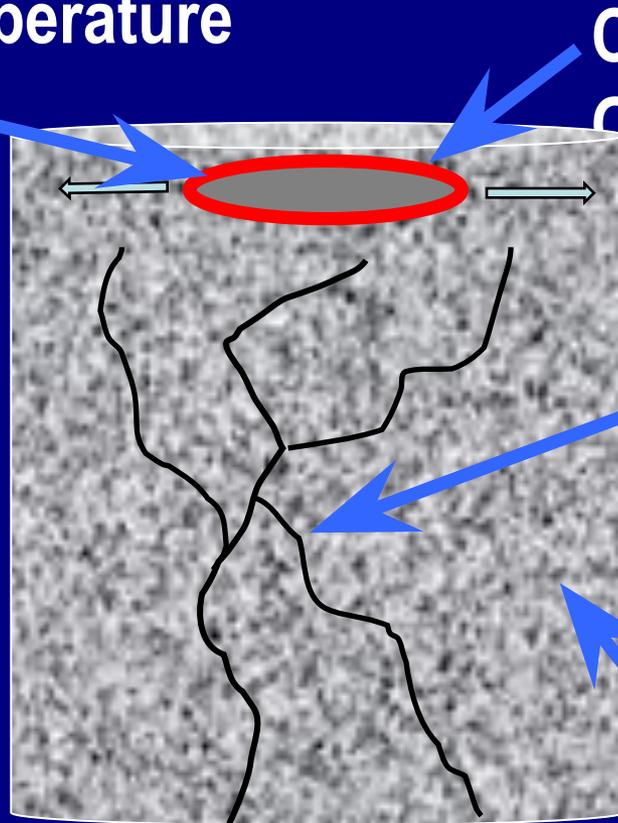
Чувствительность параметров



Casing – Cement

Обсадная колонна - Цемент

Pressure or Temperature
Increase
Увеличение
давления или
температуры



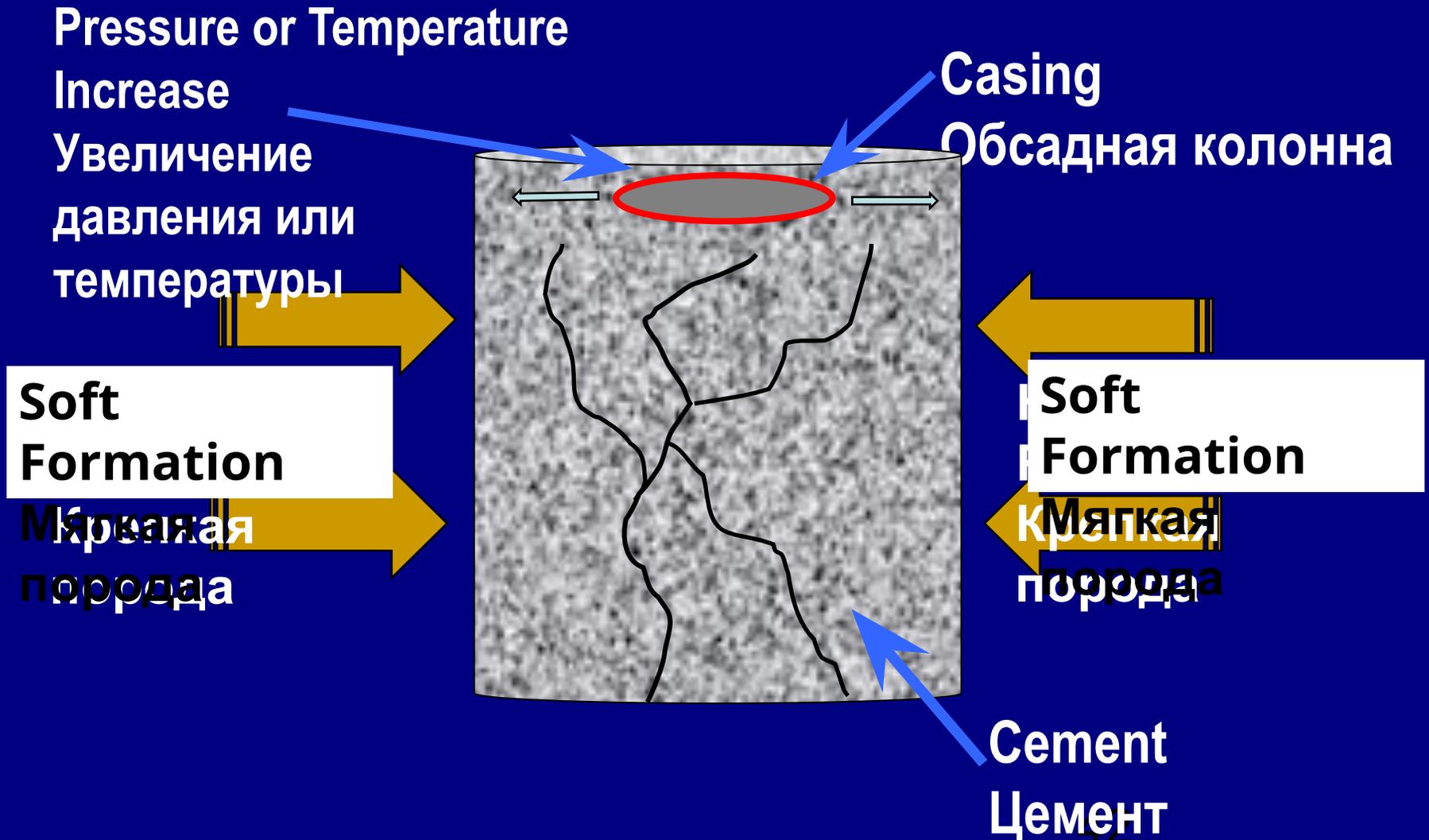
Casing
Обсадная колонна

Tensile Cracks
Трещины
разрывов

Cement
Цемент

Casing-Cement-Formation

Обсадная колонна-Цемент-Пласт



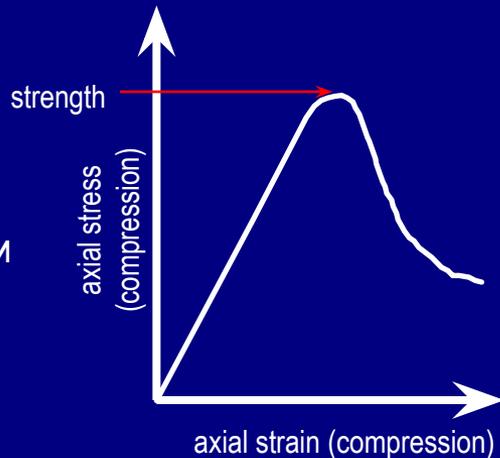
Mechanical Properties

Механические свойства

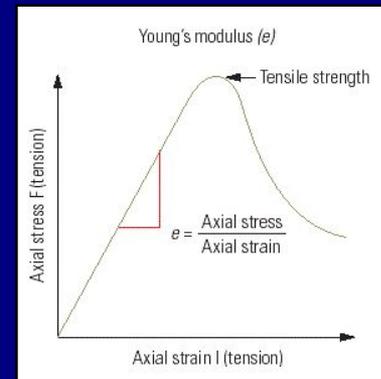
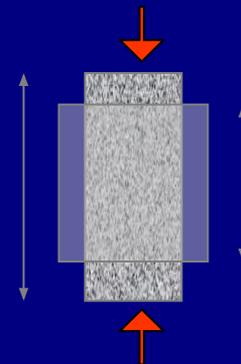
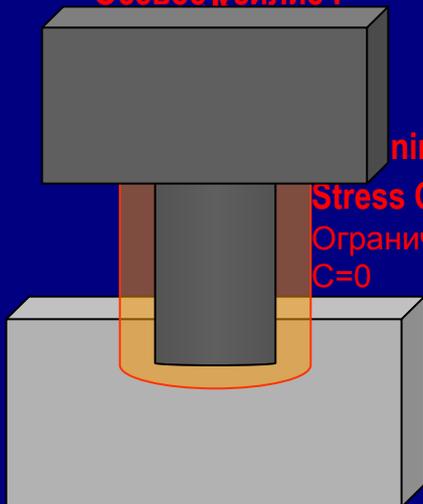
“Optimized” Mechanical Properties

«Оптимизированные» механические свойства

Compressive Strength
Предел прочности при сжатии



Axial Load F
Осевое усилие F

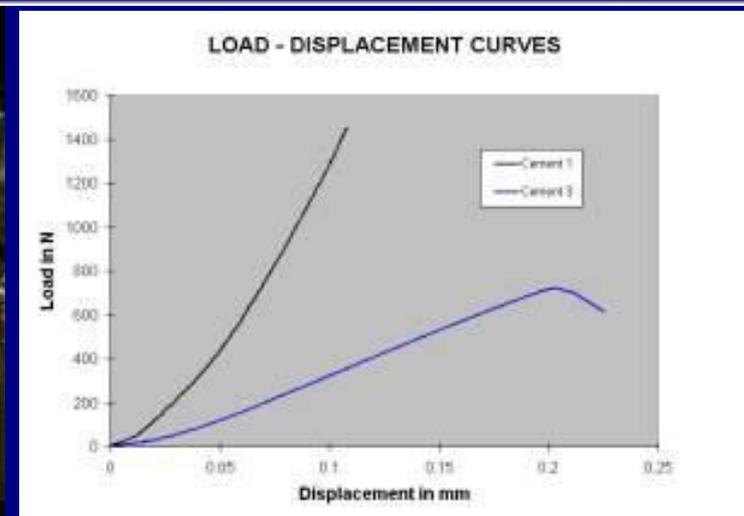
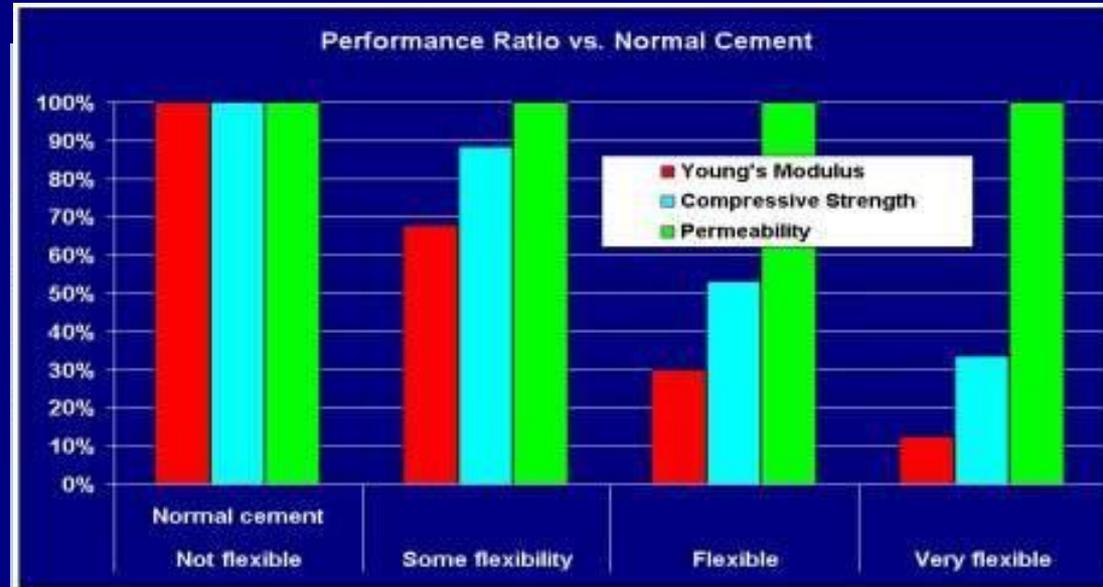


- Young's modulus, E
 - (ratio of stress to strain)
- Модуль Юнга, E
 - (отношение напряжения к деформации)
- Poisson's ratio, ν
 - (ratio of lateral strain to axial strain)
- Коэффициент Пуассона, ν
 - (отношение поперечной деформации к продольной деформации)

- Tensile strength
- Предел прочности на разрыв

Isolation Made Durable / Длительная изоляция

- Controlled flexibility and expansion
 - Isolation maintained during P, T changes
 - From construction to abandonment
- Контролируемые гибкость и расширение
 - Изоляция сохраняется при изменениях P и T
 - От строительства до ликвидации



A Tool in Well Architecture

Инструмент, используемый при построении скважины

Summary

Выводы

Cement in the Past

Цемент в прошлом

- A necessary evil?
- Commodity?
- Необходимое зло?
- Полезный продукт?



Cementing Today

Цементирование сегодня



- **Solutions portfolio**
- Портфель решений
 - Not only slurry performance
 - Не только характеристики цементного раствора
- Set material properties
Установленные свойства материала
 - Short/long-term well requirements
 - Кратко/долгосрочные требования к скважине
- **Modeling tools**
- Средства моделирования
 - Fit-for-purpose, cost-effective system
 - Целевая, экономически эффективная система

Cementing Tomorrow: A Technology for the Future

Цементирование завтрашнего дня:

Технология будущего

- Evolving cement industry
 - Still considerable academic research
 - CO2 emissions
 - Important engineering development
- Развивающаяся цементная промышленность
 - До сих пор проводятся научные исследования
 - Выбросы CO2
 - Важные технологические разработки

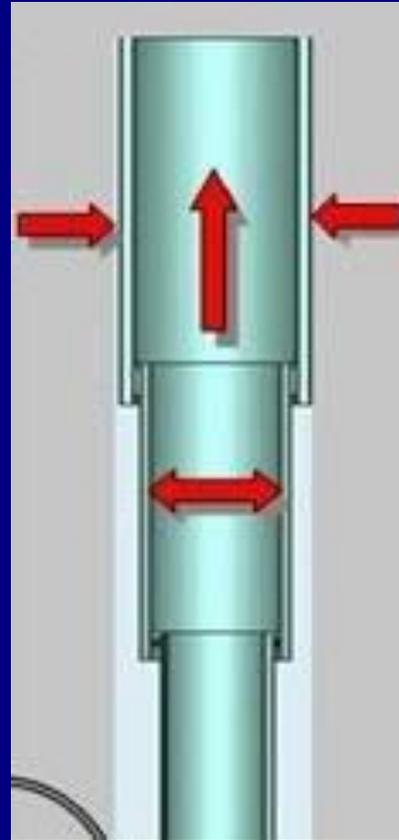


Cementing Tomorrow: A Technology for the Future

Цементирование завтрашнего дня:

Технология будущего

- Oilfield cementing industry
 - More tools in the toolbox
 - Materials, simulators
 - Adapt to tomorrow's well requirements
 - A true well engineering technology
- Нефтепромысловая цементная промышленность
 - Больше инструментов в наборе
 - Материалы, симуляторы
 - Приспособление к требованиям по скважинам завтрашнего дня
 - Истинная технология проектирования скважины

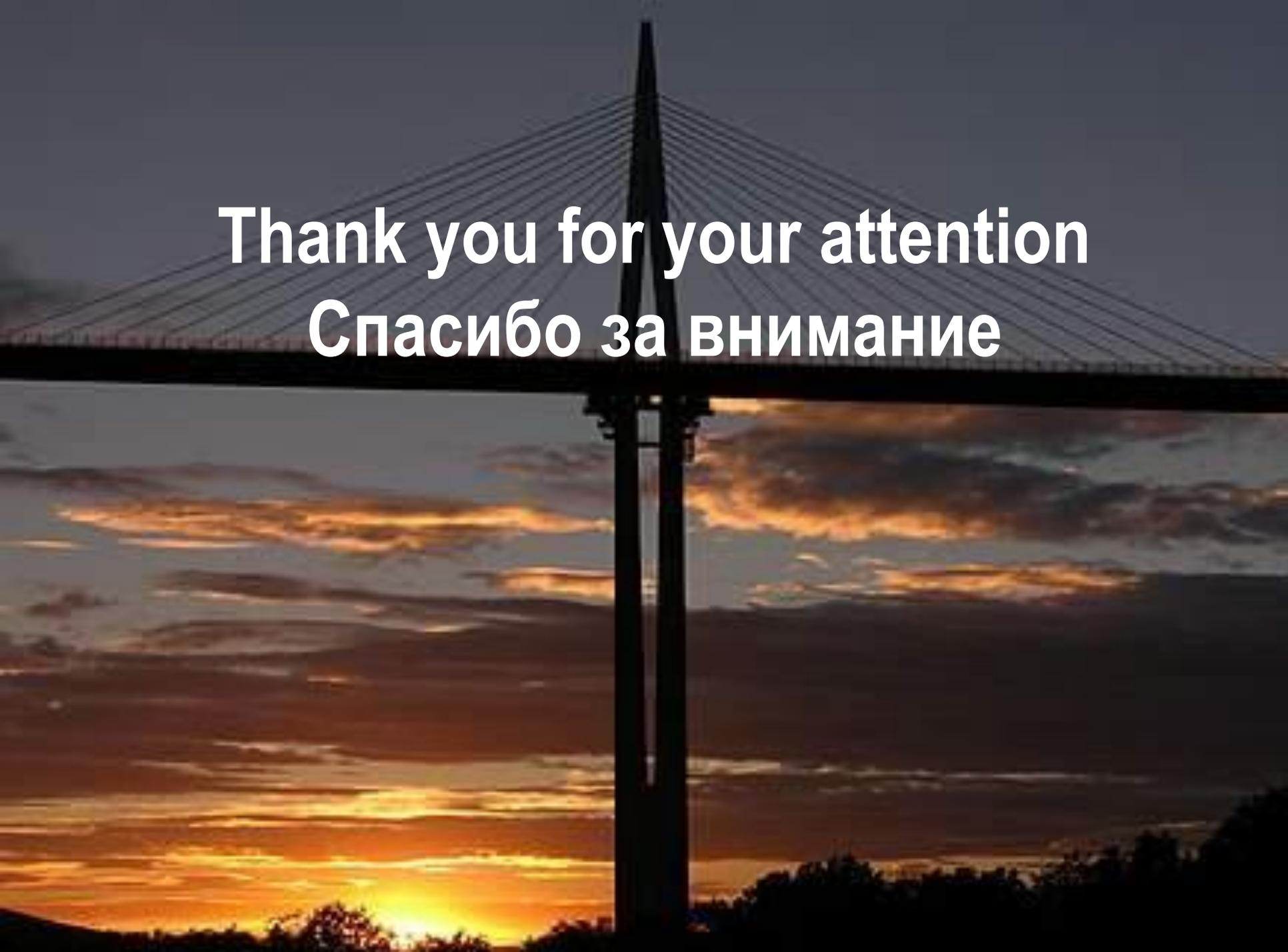


Cementing Tomorrow: A Technology for the Future

Цементирование завтрашнего дня:

Технология будущего

- Oilwell cementing has evolved considerably
- Oilwell cementing will continue to quickly adapt
 - New cements from cement manufacturers
 - New tools from cementing service industry
 - Physically active, chemically re-active or inert materials
 - Process design/simulation means
 - A true well engineering technology
- An interesting future
 - Integrated in well design & construction process
- Процесс цементирования нефтяных скважин претерпел существенное развитие
- Процесс цементирования нефтяных скважин будет и впредь быстро адаптироваться
 - Появятся новые цементы от производителей цементных материалов
 - Индустрия цементных услуг предложит новые инструменты
 - Физически активные, химически реактивные или инертные материалы
 - Средства проектирования/ моделирования процесса
 - Истинная технология проектирования скважины
- Интересное будущее
 - Интегрирование в процесс проектирования и строительства скважины

A cable-stayed bridge is silhouetted against a dramatic sunset sky. The sun is low on the horizon, casting a warm orange and yellow glow across the clouds. The bridge's central pylon and stay cables are visible, creating a geometric pattern against the sky. The text "Thank you for your attention" and "Спасибо за внимание" is overlaid in white, bold font in the upper center of the image.

Thank you for your attention
Спасибо за внимание

